文章编号： 1007-4627(2023) 01-0040-07

# 气体单元低温纯化系统的研制

李金海[1,2]，侯东升[1,2]，朱浩钒[1,2]，范锐[1,2]，徐新星[1,2,3]，周小红[1,2,3]，刘忠[1,2]，李朋杰[1]，王凯龙[1]，刘嘉健[1]，黄燃[1]，简豪[1,2]，高雨枫[1,2]，戴凡超[1,2]，查思贤[1,2]，常志芳[1,2]，覃淑炼[1,2]，孔成[1,2]，阎赫轩[1,2]，徐浩维[1,2]，尹国庆[4]，王沛[4]，张军辉[1,2,3]，何源[1,2,3]，王猛[1,2,3]，孙志宇[1,2,3]，胡正国[1,2,3]，徐瑚珊[1,2,3]

(1. 中国科学院近代物理研究所，甘肃 兰州 730000;
2. 中国科学院大学核科学与技术学院，北京 100049;
3. 先进能源科学与技术广东省实验室，广东 惠州 516003;
4. 安徽万瑞冷电科技有限公司，安徽 合肥 230000)

**摘要：** 重锕系核弹靶组合的多核子转移反应可能是产生丰中子超重核的重要突破口，因此设计建造适用于多核子转移反应的丰中子超重核研究的原理性谱仪不仅可以为探索超重核稳定岛奠定技术、方法和装置基础，而且对研究多核子转移反应机制有重要意义。丰中子超重核研究原理性谱仪中的气体单元需要持续不断的高纯度氦气，以停阻多核子转移反应产物并将降能后的离子引出到后续的实验装置。论文主要介绍新研制的丰中子超重核研究原理性谱仪的气体单元低温纯化系统，此系统主要为谱仪提供可循环的高纯度氦气。经实验测定，低温纯化系统可以将 99% 的氦气纯化到 99.999% 以上，结合化学纯化单元，纯化后的氦气满足气体单元对高纯度氦气的需求。

**关键词：** 多核子转移反应；气体单元；低温纯化系统；高纯度氦气

**中图分类号：** O571.1 **文献标志码：** A **DOI：** 10.11804/NuclPhysRev.37.01.40

## 引言

自 20 世纪 60 年代以来，探索超重核稳定岛、合成新元素已经成为核物理领域最热门的研究课题之一，人类对超重核稳定岛的探索从未止步。理论研究表明：超重核稳定岛位于以质子数 114、中子数 184 为中心的核区，此核区内原子核寿命较长，相对稳定[1-2]。攀登超重核稳定岛不仅能够揭示原子核在极强库仑场下的性质与结构，也有可能发现最大核幻数。此外，合成超重核稳定岛上的长寿命同位素将有利于研究超重核素的物理和化学性质，发掘其巨大的潜在应用价值。近几十年来，科学家们利用熔合蒸发等各类核反应合成了数十种超重新核素[3-4]。但受制于反应机制，目前人工合成的超重核素都位于核素图缺中子一侧。实验上，合成稳定岛丰中子一侧的核素仍面临巨大的挑战。随着强流重离子加速器技术的发展，重锕系核弹靶组合的多核子转移反应可能是产生丰中子超重核的重要突破口[5]。此外，利用多核子转移反应还可以合成缺中子核素以及中子数为 126 的与 r-过程相关的丰中子核素[6-7]。但多核子转移反应的产物种类繁多，角分布显示出强烈的各向异性，能量和电荷态分布范围宽[8]，利用现有的实验方法与装置无法很好地将其分离与鉴别，因此，设计建造适用于多核子转移反应的丰中子超重核谱仪非常必要。

在核物理领域，气体单元被广泛地应用于停阻核反应产物。在早期的研究中，主要是将气体单元与在线同位素分离装置相结合，使核反应在气体单元中发生并将反应产物从气体单元中引出。这项技术在 Jyväskylä[9]、Leuven[10] 和 Mainz[11] 都得到了应用。而新一代的气体单元主要是与 In-Flight 同位素分离装置相结合，即核反应在气体单元外发生，之后利用气体单元将反应产生的离子束停阻并引出。ANL[12]、NSCL-MSU[13] 和 RIKEN[14] 的研究团队均研制并测试了新一代气体单元。我国“十二五”重大科技基础设施“强流重离子加速器装置 (HIAF)”将于 2025 年左右正式运行[15]，这为利用多核子转移反应探索超重核稳定岛提供了前所未有的实验条件，是探索超重核稳定岛的重大机遇。因此，研制一台稳定可靠的丰中子超重核研究原理性谱仪势在必行。目前，近代物理研究所的研究人员正在设计建造一台适用于多核子转

**收稿日期：** 2023-10-31； **修改日期：** 2023-10-31
**基金项目：** 中国科学院战略性先导科技专项（B 类）(XDB34010300)；中国科学院改善科研条件专项（GSZXKYZB20220190）；国家自然科学基金资助项目（12022501，12105329）
**作者简介：** 李金海（1999–），男，陕西渭南，硕士研究生，从事实验核物理研究；E-mail: lijinhai@impcas.ac.cn
**通信作者：** E-mail: xinxing@impcas.ac.cn
**通信作者：** E-mail: zxh@impcas.ac.cn

移反应的丰中子超重核研究原理性谱仪，气体单元是谱仪中最为重要的组成部分，其功能是停阻多核子转移反应产物并将降能后的离子引出到后续的实验装置。离子穿过入射窗后，与气体单元内部的气体分子或原子不断碰撞损失能量并交换电荷。因此，气体单元停阻介质的种类、纯度将直接影响离子在气体单元中的存活率[16-17]。

氦气是一种无色、无味的惰性气体，是自然界中最难液化的气体，其化学性质极其稳定，一般情况下不与任何元素化合，是很好的停阻介质。此外，为了加快离子在气体单元中的迁移速度，一般会在气体单元中设置电场，所以停阻下来的反应产物需保持一定的电荷态，而氦元素具有所有元素中最高的第一电离能[18]，可以确保停阻下来的离子保持一定的电荷态。基于以上优良特性，新设计的气体单元选用氦气作为停阻介质。氦气的纯度是影响离子存活率的关键因素，如果氦气中存在杂质，杂质不仅会将离子中和为原子，从而降低离子存活率，也会影响后续反应产物的分离与鉴别。在实验时，气体单元需要持续不断的纯度为 99.99999% 的高纯度氦气，氦气的消耗极大。但氦气在地球上含量极少，且分布不均匀，我国又是氦气稀缺国家，高纯度氦气的价格十分昂贵[19-20]。因此，为实现持续供应高纯度氦气的同时减少氦气的消耗量，确保实验可靠性的同时降低实验成本，我们设计建造了一套用于丰中子超重核研究原理性谱仪的氦气低温纯化循环系统。

## 1　基本原理

氦气可以通过物理或化学方法进行纯化，根据不同的纯度要求，采用不同的纯化方式。目前主流的氦气纯化方式包括低温冷凝、膜分离和化学纯化[21-23]。膜分离法对薄膜要求较高，纯化精度较差；化学纯化的纯化精度较高，但通常需要特殊的试剂和滤芯，纯化时间较长；低温冷凝纯化是指在纯化过程中利用冷凝、凝固、低温吸附等方式来分离杂质。氦气中杂质气体的基本物性如表 1所示，在实际应用中可以通过降低氦气温度至杂质气体的沸点和凝固点以下，令杂质气体液化或固化，进而分离并清除氦气中的水、氧、氢、氮等杂质。低温纯化因其纯化效率高，技术手段较为简单[16] 等优势而被广泛使用。为尽可能地提高离子存活率，气体单元对氦气纯度要求极高，若直接使用化学方法对氦气进行纯化，纯化所需时间较长，效率较低，无法长时间不间断地为气体单元提供足量的高纯度氦气，不能满足实验需求；而低温纯化的效率较高且实现过程较为简单，但纯化后的氦气纯度略低。为了满足实验对高纯度氦气的需求，本纯化系统采用低温与化学纯化相结合的方式对氦气进行纯化。低温纯化系统用于将 99% 的氦气纯化至 99.999% 及

表 1　氦气中杂质气体的基本物性

| 杂质气体（化学式） | 标准沸点 ($T_b$ / K) | 标准凝固点 ($T_f$ / K) |
|---|---|---|
| He | 4.22 | - |
| $H_2O$ | 373 | 273 |
| $N_2$ | 77.4 | 63.1 |
| $O_2$ | 90.2 | 54.4 |
| $H_2$ | 20.3 | 13.8 |

以上，随后利用化学纯化器将经过低温纯化的纯度达到 99.999% 的氦气进一步纯化至 99.99999%，两种方法相结合的纯化方式不仅可以提升整个纯化过程的效率，也实现了高纯度氦气的稳定供给与循环利用，满足实验需求的同时极大地降低实验成本。本文将主要介绍低温纯化系统。

## 2　系统设计

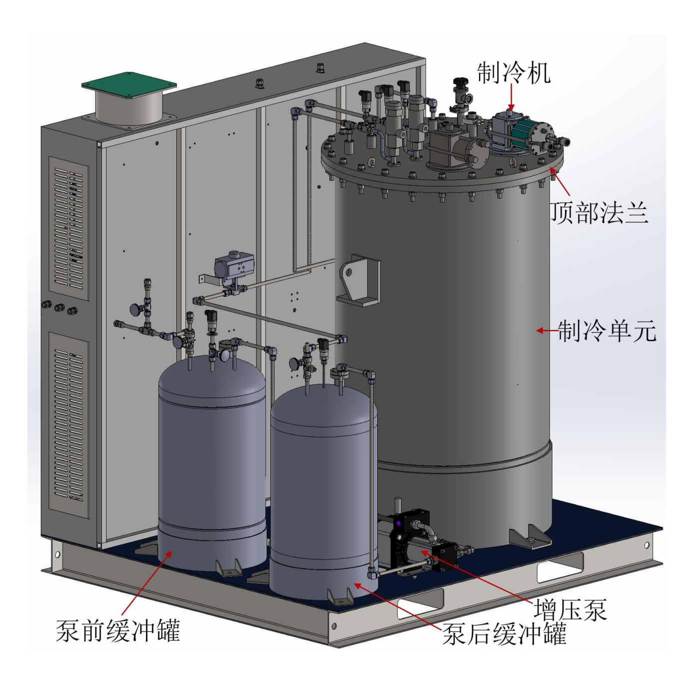



图 1　（在线彩图）低温纯化系统整体设计图

设计纯化系统的主要目的是为气体单元提供持续不断的高纯度氦气，并循环利用使用后的氦气。因此，纯化效率和氦气纯度是整套纯化系统的关键指标。丰中子超重核研究原理性谱仪的高纯度氦气受到分子泵、气体单元以及传输管路的污染，其纯度预计降为 99% 左右。

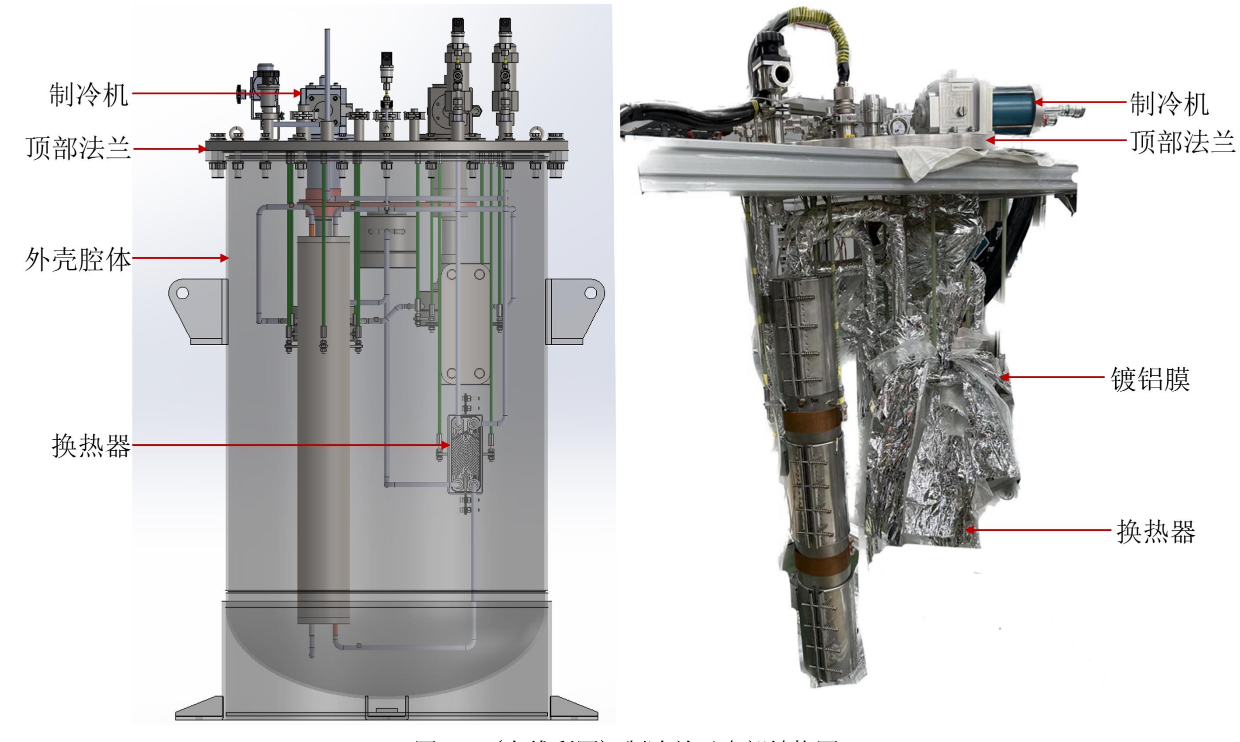



图 2 （在线彩图）制冷单元内部结构图

左：设计图 右：实物图

表 2 制冷机参数

| | 万瑞 GM415 | 住友 RDK408S |
|---|---|---|
| 一级冷头制冷功率 | 35 W@50 K | 35 W@45 K |
| 二级冷头制冷功率 | 1.5 W@4.2 K | 5.4 W@10 K |
| 冷头重量 | 19 kg | 17.2 kg |
| 输入功率 | 5.5 kW | 8.2 kW |
| 降温时间 | 60 min | 60 min |

低温纯化系统通过控制温度使不同的气体杂质液化或固化，进而从氦气中分离，提升氦气的纯度。整套低温纯化系统由氦气缓冲罐、制冷单元、增压泵、各类阀门以及多条管路组成。阀门的控制主要采用气动方式，同时包括针阀、手动球阀、减压阀、单向阀和安全阀等。此外，管路中还安装有流量控制计，用于调节不同管路中的氦气流量。目前，整套低温纯化系统的加工与装配已由安徽万瑞冷电科技有限公司完成[24]，系统整体设计图如图 1所示。

在整套低温纯化系统中，制冷单元起着关键作用，图 2显示了系统中制冷单元的内部结构。制冷单元外壳腔体的材料为 304 不锈钢；内部装有多个温度传感器和三个加热器，温度传感器用于记录各个重要部位的温度，以便分离不同的气体杂质；三个加热器分别安装在冷头与回温换热器附近用于调节温度并保证再生阶段的顺利进行。制冷单元选用万瑞的 GM415 制冷机[24] 和住友的 RDK408S 制冷机[25] 作为冷源为系统提供足够的冷量，每台制冷机都有一级冷头和二级冷头。制冷机的参数如表 2所示。实际装配时，将两台制冷机的一级冷头并联耦合到一级冷头换热器上；GM415 制冷机的二级冷头为二级冷头换热器提供冷量，RDK408S 制冷机的二级冷头作为备用冷源在系统故障或冷量不够时使用。制冷机型号的选择主要考虑了制冷机的冷量与实际所需冷量，一级冷头换热器主要用于将污氦降至一定温度，使其中的杂质气体充分液化，由于氮气在 63.1 K 时会发生固化，为了防止一级冷头换热器出现冻堵的情况，因此把一级冷头换热器的出口温度设置为 65 K，这样的温度设置既有利于氦气纯度达到最优值，也能保证换热器正常工作。一级冷头的主要热负荷为 99% 氦气和 1% 杂质气体降温至 65 K 的热负荷和冷箱漏热。根据经验，冷箱漏热定为 5 W，粗略估算一级冷头所需要冷量为 55 W@65 K。在一级冷头换热器处除去了氦气中的绝大多数杂质后，二级

冷头换热器的主要作用是提供极低的温度，固化其他的杂质气体。此外，为了高效利用制冷机的冷量，在制冷单元中除了一级与二级冷头换热器，还装配有 DEVOR 公司[26] 的 BX4TH 型一级板式回温换热器和万瑞公司[24] 自主设计的二级负压回温换热器，二级负压回温换热器采用紫铜螺旋管制成，依次沿着螺旋方向真空钎焊翅片，有孔翅片和无孔翅片交替布置，大幅强化壳侧与管内流体的换热能力。一级板式回温换热器用于将经过纯化的冷氦气回温，其热源为进入制冷单元的污氦，所以一级板式回温换热器也可以认为是污氦的预冷换热器。二级负压回温换热器装配在二级冷头换热器附近，经过二级冷头换热器的冷氦气同时对要进入二级冷头换热器的氦气进行预冷。最后使用镀铝薄膜将制冷机和换热器进行包裹，使用时保持制冷单元腔体的真空为 $10^{-2}$ Pa，以减少辐射漏热和对流漏热，提供绝热环境并保证制冷机和换热器的效率。图 2的实物图中显示了使用镀铝膜包裹的制冷机和换热器。在实际测试时，二级冷头换热器的温度可达 10 K 左右，完全满足实际需求。

氦气的整个纯化流程包括停止、再生、吹扫、干冷、预冷和纯化六个阶段。系统的管路包括氦气纯化管路、氦气纯度检测管路和安全排放管路等。图3显示了整套低温纯化系统的氦气纯化流程，下文对每个阶段进行单独说明:

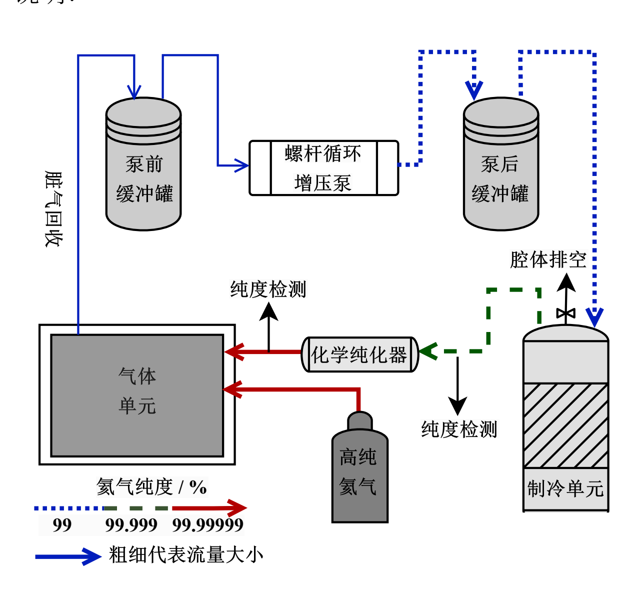



图 3　（在线彩图）纯化流程图

(1)　停止阶段: 低温纯化系统最开始时处于停止状态，或纯化器达到饱和时系统暂停。此时，进入制冷单元的阀门均处于关闭状态，制冷机也未开启，仅开启用于吹扫排空的阀门。

(2)　再生阶段: 进行纯化之前，疏通管路中因杂质固化以及低温吸附等造成的堵塞，使纯化系统可以再次正常工作。此阶段主要是利用加热器加热制冷管路，使凝结在管壁上的杂质重新变为气态。

(3)　吹扫阶段: 将杂质气体吹出。开启进入制冷单元的所有阀门，利用高纯度氦气将杂质气体通过排空管路吹出。吹出阶段结束后，关闭吹扫排空管路。

(4)　干冷阶段: 通过降低系统温度来除去吹扫过程中残留的水分。

(5)　预冷阶段: 利用制冷机将制冷单元内的制冷管路与氦气降至目标操作温度之下，为后续纯化做好准备。

(6)　纯化阶段: 低温纯化最重要的阶段，当系统预冷结束后，将低纯度氦气引入系统，对其进行纯化。纯化后的氦气通过纯度检测仪检测，并利用流量控制器控制其流量。

从停止阶段开始到纯化阶段结束，即为低温纯化系统的整个工作流程。在实际实验时，停止、再生、吹扫、干冷、预冷为实验前的准备过程。当实验开始进行时，低温纯化系统持续处于纯化阶段。此外，为了避免因低温纯化系统暂停而影响实验继续进行，当纯化系统暂停时，可以直接将备用高纯度氦气通入气体单元。

## 3　测试方案与结果

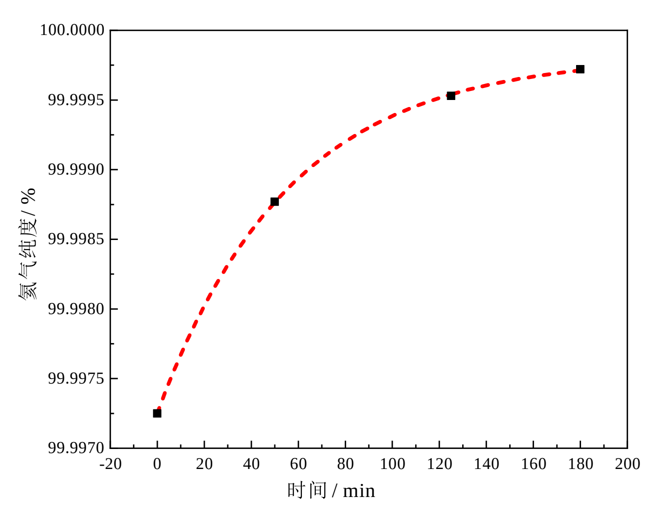



图 4　（在线彩图）氦气纯度变化

作为低温纯化系统最关键的指标之一，氦气纯度对于衡量系统的好坏至关重要。一般通过测定氦气中的水分 ($H_2O$)，氮气 ($N_2$)、以及碳氢化合物 ($C_xH_y$) 等杂质的含量来确定氦气的纯度。多组分露点仪采用不同的测量技术和传感器，可以同时测量氦气中水蒸气、氮气、以及碳氢化合物等的露点或结露点，结合红外吸收、电解传感器或热导率等技术，检测气体中的杂质含量。露点

表 3 氦气纯度与杂质含量记录表

| 时间/ min | 入口纯度/ % | 出口纯度/ % | $H_2O$ / ppm | $N_2$ / ppm | $C_xH_y$ / ppm |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 99 | 99.99725 | 26.1 | 0 | 1.4 |
| 50 | 99 | 99.99877 | 11.3 | 0 | 1 |
| 125 | 99 | 99.99953 | 4.7 | 0 | 0 |
| 180 | 99 | 99.99972 | 2.8 | 0 | 0 |

仪通过湿度传感器感知气体中水分含量的变化，确定露点温度，并推算出氦气中的水分含量。较低的露点温度反映出氦气中水含量较低。在检测碳氢化合物时，露点仪利用红外吸收，热导率检测等技术，测得其含量。通过测定不同杂质组分的含量，准确得到氦气的纯度。本次测试使用多组分露点仪 (MDM300)[27] 对氦气中的水、氮、碳氢含量进行测定，进而得到氦气的纯度。

对于低温纯化系统的纯化效果、稳定性、及可恢复性三方面的性能，我们进行了以下测试并得到初步结果：

(1) 纯化效果测试：在完成实验前的准备工作后，将纯度为 99% 的氦气引入低温纯化系统进行纯化，同时测定纯化后的氦气纯度。表3中记录了不同时间测定的氦气纯度与杂质含量，图4显示了氦气纯度随测试时间的变化趋势。测试结果显示，99% 的氦气经过单次低温纯化后，在出口处的纯度达到了 99.99725%，纯度较低的原因是纯化系统管路中还有杂质残留，经过 3 小时的运行，管路中的杂质基本排空，氦气纯度达到 99.99972%，纯化效果良好，达到了预期的目标。

(2) 稳定性测试：为保证低温纯化系统在实际应用中长时间运行，测试系统的稳定性非常必要。因此，本次测试实验对低温纯化系统进行了长时间的稳定性测试。将 99% 的氦气长时间通入系统，同时测定经过系统后的氦气纯度。在为期两周的测试期间，纯化系统未发生堵塞，纯化效果良好，稳定性较好。除本测试之外，低温纯化系统在三个月内多次重复使用，期间并未观察到系统性能变差，意味着此低温纯化系统可以在实验中长时间稳定运行，为后续低截面核物理实验奠定了坚实的基础。

(3) 可恢复性测试：由于低温纯化系统是将氦气中的杂质冻结在传输管路内以完成纯化，故长时间的运行可能造成管路堵塞。为了解低温纯化系统实际运行时管路发生堵塞后的恢复时间，本次测试实验对低温纯化系统进行了可恢复性测试。将掺杂了空气的氦气长时间通入纯化系统，人为造成管路堵塞，测试其再生吹扫性能。测试结果表明：当管路发生堵塞后，在 24 小时内即可完成再生和吹扫，可以很好地解决堵塞问题，系统的可恢复性良好。另外，如上文所述，低温纯化系统在制冷单元外还设计有一条直通气体单元的管路，当制冷单元处于恢复期时，可以将纯度为 99.99999% 的高纯度氦气直接通入气体单元而不影响核物理实验的正常进行。

本次测试实验选用 99% 的氦气进行测试，后续还将开展更多纯化实验并测试系统其他部分的性能。

## 4 结论

利用多核子转移反应探索超重核稳定岛、合成丰中子新核素是未来核物理发展的重要方向。丰中子超重核研究原理性谱仪作为进行此类实验的装置基础，其完善和发展离不开氦气纯化系统的支持。经过测试，本课题组研制的低温纯化系统达到了氦气纯化的预期目标，最终纯化后的氦气纯度可达 99.999% 以上，结合化学纯化单元，纯化后的氦气满足气体单元对高纯度氦气的需求。此外，该系统表现出良好的稳定性和可恢复性，能够长时间稳定运行并对使用过的氦气进行纯化处理，显著地降低实验成本。因此，该低温纯化系统为利用多核子转移反应探索超重核稳定岛奠定了可靠的装置基础。

## 参考文献

[1] SOBICZEWSKI A, GAREEV F A, KALINKIN B N. Phys Lett, 1966, 22(4): 500. DOI: 10.1016/0031-9163(66)91243-1.

[2] NILSSON S G, TSANG C F, SOBICZEWSKI A, et al. Nucl Phys A, 1969, 131(1): 1. DOI: 10.1016/0375-9474(69)90809-4.

[3] NIU F, CHEN P H, FENG Z Q. Nucl Sci Tech, 2021, 32(10): 103. DOI: 10.1007/S41365-021-00946-3.

[4] HUANG M, GAN Z, ZHANG Z, et al. Phys Lett B, 2022, 834: 137484. DOI: 10.1016/j.physletb.2022.137484.

[5] ZAGREBAEV V I, GREINER W. Phys Rev C, 2013, 87(3): 034608. DOI: 10.1103/PhysRevC.87.034608.

[6] DEVARAJA H M, HEINZ S, BELIUSKINA O, et al. Phys Lett B, 2015, 748: 199. DOI: 10.1016/j.physletb.2015.07.006.

[7] ZHAO K, LIU Z, ZHANG F S, et al. Phys Lett B, 2021, 815: 136101. DOI: 10.1016/j.physletb.2021.136101.

[8] EL-NADI M, SHARAF M A. J Phys A: Gen Phys, 2001, 54(1): 201. DOI: 10.1088/0305-4470/3/2/010.

[9] J. ÄRJE J H K V A H, J. Äystö. Nucl Instrum Methods Phys Res, 1981, 186(1-2): 149. DOI: 10.1016/0029-554X(81)90900-9.

[10] KUDRYAVTSEV Y, ANDRZEJEWSKI J, BIJNENS N, et al. Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B, 1996, 114(3-4): 350. DOI: 10.1016/0168-583X(96)00194-2.

[11] BACKE H, HIES M, KUNZ H, et al. Phys Rev Lett, 1998, 80(5): 920. DOI: 10.1103/PhysRevLett.80.920.

[12] MAIER M, BOUDREAU C, BUCHINGER F, et al. Hyperfine Interact, 2001, 132(1/4): 517. DOI: 10.1023/A:1011999501739.

[13] SCHWARZ S, BOLLEN G, LAWTON D, et al. Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B, 2003, 204(1-2): 507. DOI: 10.1016/S0168-583X(02)02122-5.

[14] WADA, M., ISHIDA, et al. AIP Conf Proc, 2002, 606(1): 625. DOI: 10.1063/1.1454340.

[15] ZHOU X, YANG J, TEAM H P. AAPPS Bull, 2022, 32(1): 35. DOI: 10.1007/s43673-022-00064-1.

[16] RANJAN M. Design and characterization of a cryogenic stopping cell for radioactive ions[D]. Groningen, The Netherlands, 2012: 166.

[17] FACINA M, BRUYNEEL B, DEAN S, et al. Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B, 2004, 226(3): 401. DOI: 10.1016/j.nimb.2004.06.031.

[18] KAUFMAN M J, TROWBRIDGE C G. J Chem Educ, 1999, 76(1): 88. DOI: 10.1021/ed076p88.

[19] YANG Lingde, SHENG Xvming, WANG Jian, et al. Cryogenics & Superconductivity, 2016, 44(4): 4. (in Chinese) DOI: 10.16711/j.1001-7100.2016.04.004
(杨林德, 沈旭明, 王健, 等. 低温与超导, 2016, 44(4): 4.)

[20] LING Hui, ZHOU Yongyi, ZHOU Liwei, et al. Scientific Management Research. 2012, 30(6):4. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1004-115X.2012.06.006
(凌辉, 周勇义, 张黎伟, 等. 科学管理研究, 2012, 30(6): 4.)

[21] PENG Jialing, GONG Zhi, ZHANG Xvehua, et al. Cryogenics & Superconductivity, 2012, 40(6):4. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1001-7100.2012.06.002
(彭桂林, 龚智, 章学华, 等. 低温与超导, 2012, 40(6): 4.)

[22] WAN Xiaogang, FU Jian, ZHAO Linhua. Cryogenics & Superconductivity, 2011, 4(4):75-77. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1001-7100.2011.04.016
(万小刚, 傅剑, 赵林华. 低温与超导, 2011(04): 75.)

[23] WU Ling. Cryogenics & Superconductivity, 2011, 39(7):5. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1001-7100.2011.07.004
(吴玲. 低温与超导, 2011, 39(7): 5.)

[24] VACREE. vacree[EB/OL]. [2023-06-26]. https://www.vacree.com/.

[25] SUMITOMO. Sumitomo rdk-408s manuals[EB/OL]. [2023-06-26]. https://www.manualslib.com/products/Sumitomo-Rdk-408s-11012732.html.

[26] DOVER. Dover[EB/OL]. [2023-10-07]. https://www.dovercorporation.com/.

[27] INSTRUMENTS M. Michell instruments[EB/OL]. [2023-06-26]. http://www.michell.com/us/.

# Advancements in Cryogenic Purification System for Gas Cell

LI Jinhai[1, 2], HOU Dongsheng[1, 2], ZHU Haofan[1, 2], FAN Rui[1, 2], XU Xinxing[1, 2, 3], ZHOU Xiaohong[1, 2, 3], LIU Zhong[1, 2], LI Pengjie[1], WANG Kailong[1], LIU Jiajian[1], HUANG Ran[1], JIAN Hao[1, 2], GAO Yufeng[1, 2], DAI Fanchao[1, 2], ZHA Sixian[1, 2], CHANG Zhifang[1, 2], QIN Shulian[1, 2], KONG Cheng[1, 2], YAN Hexuan[1, 2], XU Haowei[1, 2], YIN Guoqing[4], WANG Pei[4], ZHANG Jiahui[1, 2, 3], HE Yuan[1, 2, 3], WANG Meng[1, 2, 3], SUN Zhiyu[1, 2, 3], HU Zhengguo[1, 2, 3], XU Hushan[1, 2, 3]

*( 1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China;*
*2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
*3. Advanced Energy Science and Technology Guangdong Laboratory, Huizhou 516003, Guangdong, China;*
*4. Vacree technologies Co., Ltd, Hefei 230000, Anhui, China )*

**Abstract:** Multinucleon transfer reactions involving heavy actinide projectile and target nuclei hold significant potential as a groundbreaking method to synthesize neutron-rich superheavy nuclei. The construction of a Principled Spectrometer for Neutron-rich Superheavy Nucleus Research is highly desirable to establish the technical, methodological, and device foundation to explore the stability island in superheavy nuclei and to study the mechanism of multinucleon transfer reactions. The gas cell of the Principled Spectrometer requires a continuous supply of high-purity helium gas to stop the energetic radioactive reaction products and to extract the energy-reduced ions to the subsequent experimental setup. The paper focuses on a newly developed cryogenic purification system for the gas cell of the spectrometer. This cryogenic purification system is designed to provide recyclable and high-purity helium for the Principled Spectrometer. With a series of tests, the cryogenic purification system has been proven to be able to purify the 99% helium gas to 99.999% or higher, fulfilling the requirements of the gas cell when used in conjunction with the chemical purification system.

**Key words:** multinucleon transfer reaction; gas cell; cryogenic purification system; high-purity helium



**Received date:** 31 Oct. 2023; **Revised date:** 31 Oct. 2023

**Foundation item:** Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences(XDB34010300); Improve Scientific Research Conditions Program of Chinese Academy of Sciences(GSZXKYZB20220190); National Natural Science Foundation of China (12022501,12105329)

**Corresponding author:** XU Xinxing, E-mail: xinxing@impcas.ac.cn

**Corresponding author:** ZHOU Xiaohong, E-mail: zxh@impcas.ac.cn